

# Op zoek naar de zwaarste ster

## III: Geboorte, leven en dood

Claude Doom

**W**E ZIEN UIT WAARNE-  
mingen dat de zwaarste  
sterren blijkbaar bij el-  
kaar gaan zitten in be-  
paalde open sterrenhopen, terwijl an-  
dere open sterrenhopen wel O-type  
sterren bevatten maar blijkbaar geen  
enkele zeer zware ster. De sterren-  
hopen met de zwaarste sterren blijken  
ook erg veel sterren (en dus erg veel  
materie) te bevatten.

De massa van een ster bij zijn ge-  
boorte hangt af van het toeval en  
wordt bepaald door de plaatselijke  
omstandigheden: hoeveel koud gas is  
er beschikbaar? Wat is de lokale tem-  
peratuur? Hoe gedraagt de pasgeboren  
ster zich? We weten dat er veel meer  
lichte dan zware sterren geboren wor-  
den. Bij de vorming van een kleine  
sterrenhoop, met bijvoorbeeld enkele  
honderden sterren, is er daarom

slechts een kleine kans dat er een zeld-  
zame zeer zware ster ontstaat. Bij de  
vorming van een sterrenhoop met vele  
duizenden sterren, stijgt die kans. Si-  
mulaties tonen aan dat men in ster-  
renhopen zoals NGC 3603 en R136,  
die naar schatting enkele duizenden  
tot enkele tienduizenden sterren bevat-  
ten, inderdaad enkele zeer zware ster-  
ren mag verwachten. Ook Cyg OB2,  
Trumpler 14 en Arches zijn rijk ge-  
vulde jonge sterrenhopen, consistent  
met de aanwezigheid van zeer zware  
sterren en dubbelsterren. Simulaties  
geven ook aan dat er nooit sterren,  
zwaarder dan 300 zonsmassa gevormd  
worden, zelfs niet in zware sterrenho-  
pen zoals NGC 3603 en R136.

### Groeiende protosterren

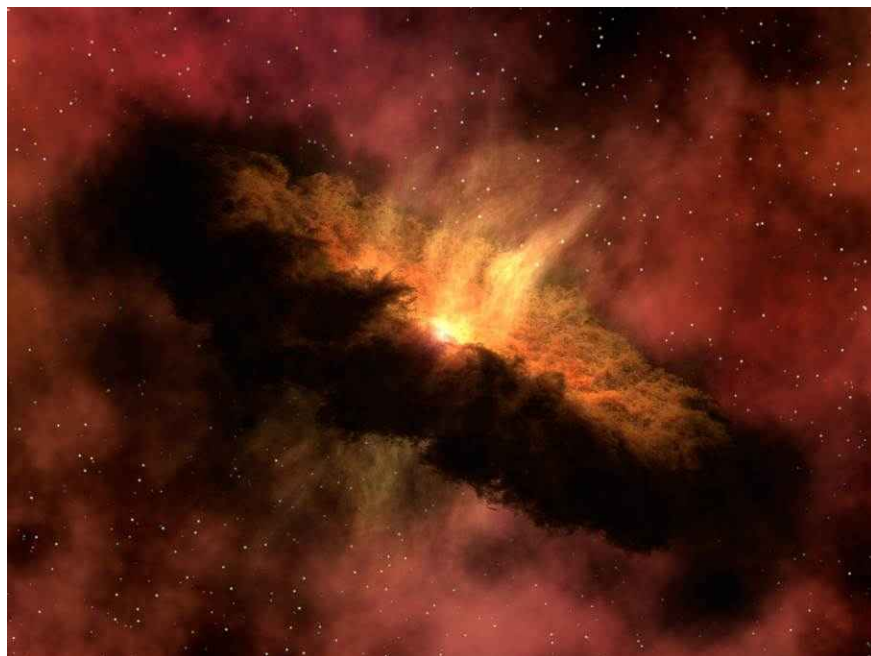
Om een zeer zware ster te vormen  
moeten we een gigantische hoeveel-

heid materie bij elkaar brengen: tien-  
tallen keren meer dan nodig was om  
de Zon te maken. En dat is niet ge-  
makkelijk.

Sterren worden gevormd uit koud  
gas in moleculaire wolken. Alles be-  
gint met de collaps van een klein stuk-  
je van de wolk tot een kleine kern, een  
soort zaadje waaruit de ster zal groei-  
en. Die kern begint onmiddellijk ma-  
terie op te vangen en zwaarder te wor-  
den. Hoe snel dit kan, hangt af van de  
omstandigheden in de koude wolk.  
Onder 'normale' omstandigheden kan  
de centrale kern, nu een protoster,  
met een honderdduizendste van een  
zonsmassa per jaar groeien. Na hon-  
derdduizend jaar hebben we dus een  
ster zoals de Zon. Als er dan nog gas  
beschikbaar is, kan het proces door-  
gaan en kunnen we zwaardere sterren  
maken. De groei stopt wanneer er  
geen gas in de buurt meer voorhanden  
is. De protoster trekt daarna verder  
samen tot in het diepe inwendige  
kernreacties losbarsten en de protoster  
een échte ster is geworden.

Wanneer een protoster echter een  
massa van ongeveer 15 keer de Zon  
bereikt, na anderhalf miljoen jaar van  
ononderbroken groei, is ze zo zwaar  
geworden dat in het inwendige spon-  
taan kernreacties op gang komen. De  
protoster wordt zo een echte ster ter-  
wijl ze nog materie aan het invangen  
is. De nieuwgeboren ster ontwikkelt  
nu zelf een sterrenwind, die het inval-  
lende gas wegblaast en elke verdere  
groei onmogelijk maakt.

Een impressie van de geboorte van een  
ster: een pas gevormde protoster vangt  
materie op vanuit een accretieschijf die  
rond de ster draait. Figuur: NASA/JPL-  
Caltech/R. Hurt (SSC).



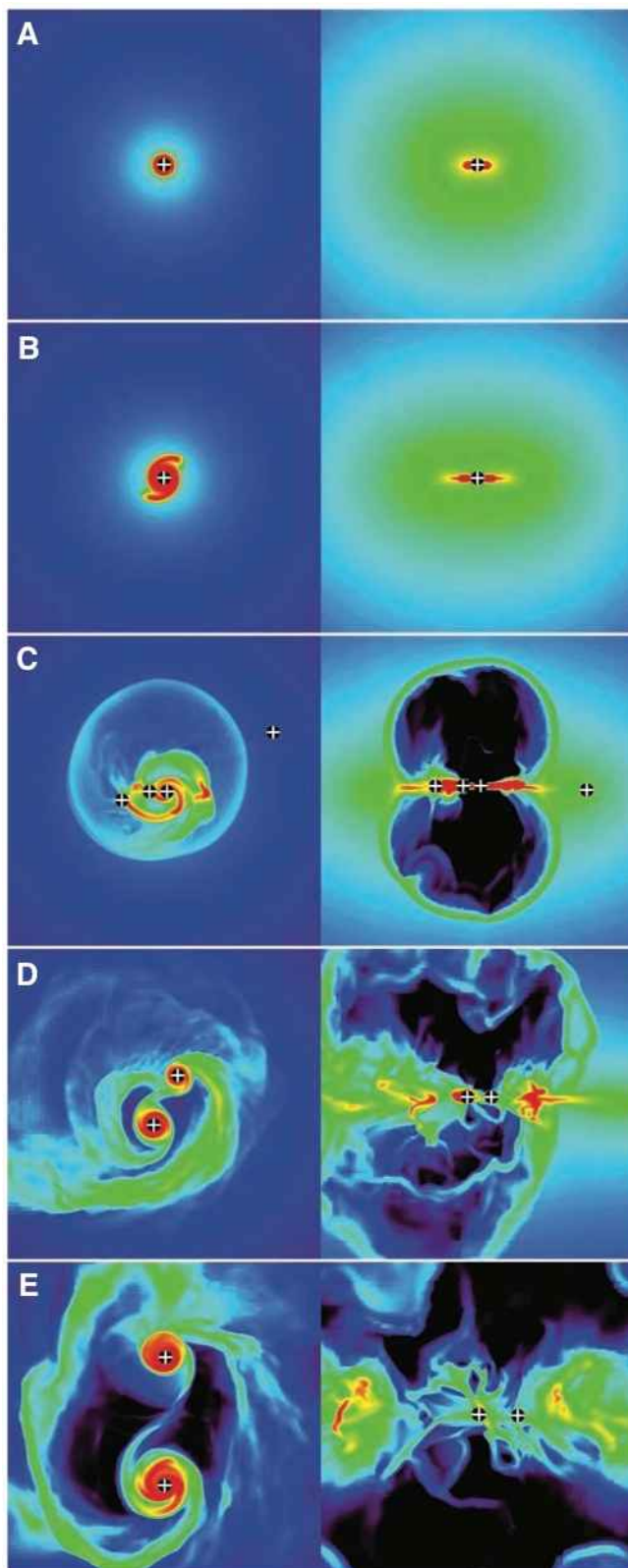
## Zware sterren vormen

Volgens dit 'klassieke' scenario kunnen dus geen sterren gevormd worden die zwaarder zijn dan ongeveer 15 keer de massa van de Zon, terwijl we aan de hemel toch dergelijke zware sterren zien. Hoe kan dat?

Er zijn twee mogelijke oplossingen. Ten eerste kunnen zware sterren gevormd worden op een analoge manier als lichtere sterren: door een kleine kern die groeit door invallend gas. Bij zware sterren groeit de protoster dan veel sneller, zodat we een zware ster kunnen maken vooraleer de kernreacties in het binnenste in gang schieten. Die snelle groei is mogelijk wanneer het invallende gas wat wordt opgewarmd. Dat kan bijvoorbeeld gebeuren door de aanwezigheid van jonge (kleine) sterren, die heftig stralen en zo hun omgeving opwarmen. Ook de aanwezigheid van een magnetveld rondom de protoster helpt. Berekeningen en simulaties tonen aan dat een protoster op die manier tot tien keer sneller kan groeien.

Toch is dit wellicht nog niet voldoende om sterren te vormen die zwaarder zijn dan enkele tientallen zonsmassa. Daarenboven dreigt bij de snelle invang van materie zoveel energie vrij te komen dat het gas in de buurt gewoon wordt weggeblazen, wat de groei van de protoster stopzet. Er zijn echter nog effecten waar we geen rekening mee hebben gehouden. De materie die op de protoster invalt, komt niet gelijkmatig uit alle mogelijke richtingen. Al kort na de vorming van de kleine kern ontstaat rond de groeiende protoster een zogenaamde accretieschijf. Dat is een schijf van stof en gas, die rond de protoster draait. Materie uit de koude wolk dwarrelt eerst neer op de accretieschijf. De materie spiraleert dan doorheen de schijf naar binnen en komt zo uiteindelijk op de protoster terecht.

Bij het 'klassieke' vormingsschema van sterren gebeurt dit alles netjes geordend. Er is een mooie stroom gas naar de schijf toe en aan de binnenkant van de schijf valt de materie naar de ster toe. Wanneer de ster echter snel groeit, ontstaat chaos in en rondom de accretieschijf. De gasstroom verloopt dan erg onregelmatig, met gebieden waar het gas uit de wolk bijzonder snel invalt op de schijf. De materie in de schijf is ook vrij compact. Daardoor wordt een deel van het intense licht, dat door de materie-invang ontstaat, opgeslorpt. Dat licht kan het omliggende gas niet meer wegblazen, waardoor er meer materie naar de protoster kan toestromen. Gedetailleerde simulaties van de vorming van sterren tonen aan dat door dit 'schaduweffect' vrij gemakkelijk zware sterren kunnen gevormd worden met een massa van vele tientallen zonsmassa. Soms vindt men in de simulaties dat er dubbelsterren ontstaan met twee zware sterren. Dergelijke dubbelsterren kunnen kort na hun vorming samensmelten tot een ster met een massa die kan oplopen tot ver boven 100 zonsmassa.



Een simulatie van de vorming van zware sterren. Links zien we een bovenaanzicht, rechts het zicht van opzij. Van boven naar beneden zijn verschillende stadia in de vorming weergegeven. We zien hoe een accretieschijf gevormd wordt (B) en hoe verschillende protosterren ontstaan die aan beide zijden van de schijf een holte 'blazen' in het invallende gas (C). Desondanks blijft het gas langs de accretieschijf naar de protosterren toestromen (D). Aan het einde van de simulatie is een zware nauwe dubbelster gevormd (E).  
Figuur: *Krumholz et al.*

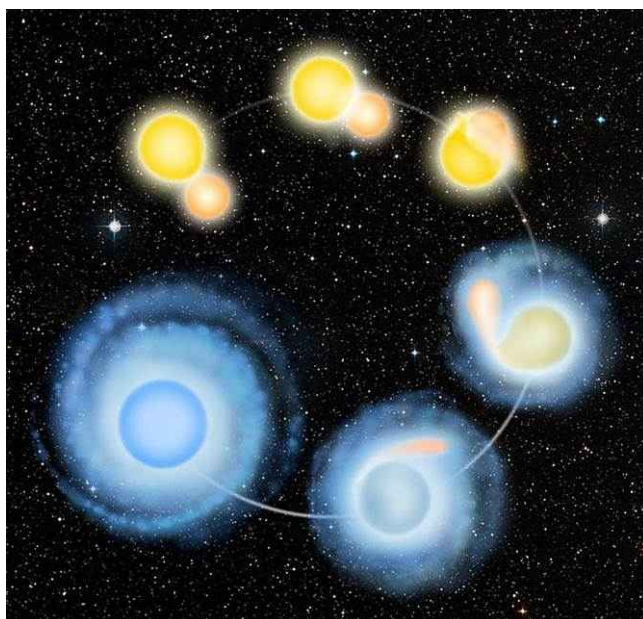


Het schaduw effect maakt het ook mogelijk om nog verder materie in te vangen, zelfs wanneer kernreacties in het inwendige op gang zijn gekomen. Daardoor kan de ster ook na zijn 'geboorte' verder groeien en zwaarder worden. Uit de meest complexe simulaties blijkt dat het op deze manier mogelijk is om sterren te vormen die tot 150 zons-massa zwaar zijn, uiteraard op voorwaarde dat er voldoende gas in de buurt beschikbaar is.

Een tweede mogelijkheid is dat zware sterren gevormd worden door onderlinge botsingen van lichtere sterren. Het moeten wel echte botsingen zijn, waarbij de sterren elkaar fysiek raken; geen dichte naderingen, waarbij de beide sterren hoogstens tijdelijk vervormd worden. Bij dergelijke echte botsingen kunnen de twee sterren samensmelten en verder als een zwaardere ster door het leven gaan. Botsingen zijn enkel waarschijnlijk wanneer sterren erg dicht bij elkaar zitten, met onderlinge afstanden van beduidend minder dan één astronomische eenheid! Helaas heeft men nog geen jonge clusters gevonden waar de sterren voldoende dicht bij elkaar staan om botsingen waarschijnlijk te maken. Ook in zeer dichte clusters bedraagt de onderlinge afstand tussen sterren gemiddeld meer dan een astronomische eenheid, zodat botsingen bijna niet voorkomen. Wellicht wordt hoogstens hier en daar een zeldzame zware ster geboren uit de botsing van twee lichtere sterren.

### Donkere wolken

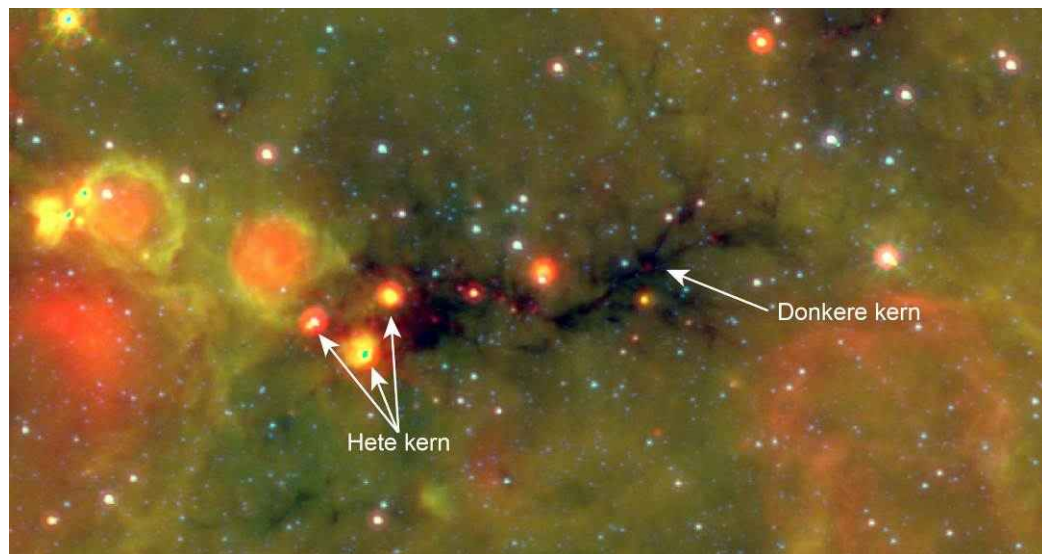
Waarnemers hebben aan de hemel enkele plaatsen ontdekt waar zich zware sterren aan het vormen zijn uit interstellair gas. Deze plaatsen worden 'donkere infraroodwolken' genoemd omdat ze infrarood licht opslorpen en enkel millimeterstraling uitzenden. Men kon deze wolken waarnemen met de Spitzer infrarood ruimtetelescoop (als donkere vlekken) en ook met de ALMA millimetertelescoop in Chili. Donkere infraroodwolken zijn kleine, dichte en koude (20 kelvin) gebiedjes binnenin een moleculaire wolk, met een massa van honderden tot duizenden keer die van de Zon. Er zit nog geen protoster in.



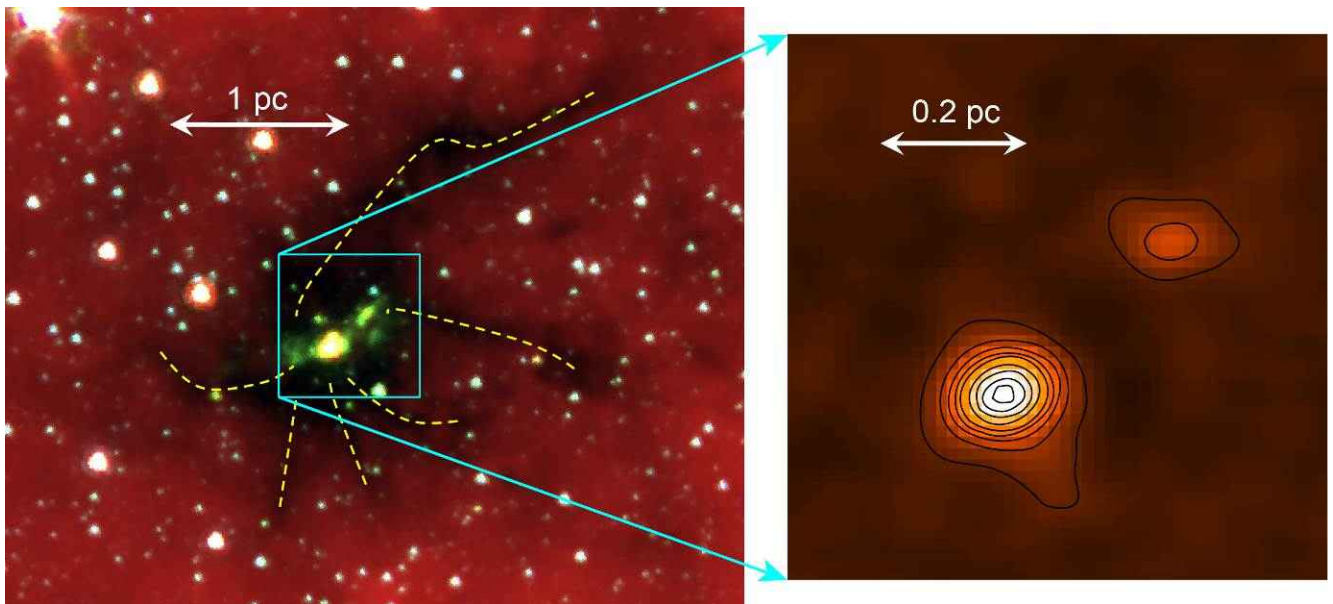
Een indruk van hoe de botsing tussen twee sterren in zijn werk kan gaan. Twee lichtere sterren botsen tegen elkaar aan, bijvoorbeeld in het centrum van een dichtbevolkte jonge sterrenhoop. Ze smelten samen tot een zware, blauwe ster. Figuur: Christopher T. Cole.

Wanneer zich in het binnenste van de donkere wolk een groeiende protoster heeft gevormd, warmt de wolk op en wordt hij een zogenaamde 'hete kern'. De inwendige temperatuur bedraagt nu ongeveer 100 kelvin. Binnenin zitten een of enkele snel groeiende protosterren. Deze hete kernen zijn zichtbaar in het infrarood (zie opname hieronder).

Wanneer de zware ster uiteindelijk geboren wordt, begint hij gigantische hoeveelheden blauw en ultraviolet licht uit te stralen. Daardoor wordt het gas in de buurt geïoniseerd. De elektronen worden van de atomen afgeslagen en het gas begint licht uit te stralen. We zien dan eerst een klein gebiedje rondom de nieuwe ster oplichten, waar vooral water-



Deze opname in infrarood licht, gemaakt met de Spitzer ruimtetelescoop, toont een donkere kern, waaruit spoedig een zware ster zal gevormd worden, en een drietal hete kernen, waar reeds een protoster aanwezig is. De opname toont een gebied van ongeveer  $10 \times 20$  boogminuten in het westelijke deel van het sterrenbeeld Aquila (Arend). Opname: Bettersby et al.



De geboorte van een zware ster. Links zien we een gebied aan de oostelijke grens van het sterrenbeeld Norma (Winkelhaak). De opname toont de donkere infraroodwolk SDC335.579-0.292, die op een afstand van 10 600 lichtjaar van ons af staat. We zien zes donkere filamenten waarlangs gas stroomt naar twee donkere kernen. Binnenin die kernen worden zware sterren gevormd. Rechts zien we een opname van de centrale kernen, gemaakt met de ALMA telescoop. Die opname toont licht met een golflengte van 3.2 mm. De massa van de kernen wordt geschat op 550 zonsmassa (links) en 65 zonsmassa (rechts). Rondom de kernen zit voldoende gas om nog een driehonderdtal sterren te vormen. Opnamen: ESO.

stof zijn elektronen is verloren. Een dergelijk object noemt men een ultracompact HII gebied. Naargelang de zware ster evolueert en nog meer licht uitstraalt, breidt het compacte HII gebied uit. Het smelt samen met de compacte HII gebieden van andere sterren in de buurt tot het een 'gewoon', uitgebreid HII gebied wordt. Hiervan zien we er aan de hemel heel wat. Het bekendste voorbeeld is de Orionnevel, waar het waterstofgas oplicht door de ioniserende straling van tientallen jonge sterren in de omgeving.

### Sterrenwind

Zeere zware sterren gaan erg actief door het leven. We weten al dat ze zeer veel licht uitstralen: ettelijke miljoenen keer meer dan de Zon. Hun oppervlak is ook erg warm: de temperatuur kan er oplopen tot meer dan 35 000 graden, waardoor ze blauw van kleur zijn (spectraaltipe O). Deze sterren hebben ook een intense sterrenwind: een stroom heet en ijl gas dat van op het oppervlak de ruimte wordt ingeblazen. Die sterrenwind wordt aangedreven door het intense licht dat de ster uitstraalt. Een zeer zware ster kan zo per miljoen jaar tot een kwart van zijn materie verliezen.

Verder doen zeer zware sterren in hun inwendige wat lichtere sterren doen: waterstof omzetten in helium. Het inwendige van zeer zware sterren is ook erg turbulent. De binnenste 80 tot 95% van deze sterren is in heftige beweging en wordt continu door elkaar gemengd door borrelende gasbellen.

Na twee tot drie miljoen jaar is in het binnenste van een zeer zware ster alle waterstof omgezet in helium. Ondertussen heeft de ster ook al meer dan de helft van zijn

buitenkant verloren door sterrenwind. Daardoor komen lagen aan het oppervlak te liggen die vroeger in het diepe inwendige van de ster zaten. Er komt zelfs materie aan het oppervlak waarin ooit kernreacties zijn geweest en waar dus al een deel van het waterstof is omgezet in helium. De zware ster is nu een Wolf-Rayet ster geworden: een zeer heldere en zeer hete ster met weinig tot geen waterstof maar wel veel helium aan de buitenkant.

Het verdere leven van zeer zware sterren wordt vooral bepaald door de intensiteit van hun sterrenwind. Zwaardere sterren hebben een intensere sterrenwind dan lichtere sterren. Dat komt omdat ze meer licht uitstralen. Sterren in ons Melkwegstelsel hebben ook een intensere sterrenwind dan sterren in de Grote Magellaanse Wolk. Dat komt omdat sterren in ons sterrenstelsel meer zware elementen (zwaarder dan helium) bevatten. In ons Melkwegstelsel verliest een zeer zware ster tijdens zijn leven 80 tot 95% van zijn materie. Hoe zwaar de ster bij zijn geboorte ook was (120 tot zelfs 500 zonsmassa), twee tot drie miljoen jaar later blijft er niet meer van over dan een 20- tot 30-tal zonsmassa.

Omdat een zeer zware ster in ons Melkwegstelsel zoveel materie verliest, eindigt hij zijn leven zoals lichtere sterren. In het inwendige worden bij steeds hogere temperaturen steeds zwaardere elementen aangemaakt. Dat gaat door tot er zich een ijzerkern vormt. Die wordt onstabiel waardoor een supernova-explosie ontstaat. Omdat de ster bij ontplofing een Wolf-Rayet ster is, waarvan de buitenkant geen waterstof meer bevat, zien we de explosie als een type Ib of Ic supernova. De buitenkant wordt weggeblazen tot een



supernovarest. Het binnenste stort in elkaar tot een neutronenster of tot een zwart gat.

### Paarvorming

De situatie is lichtjes anders in de Grote Magellaanse Wolk. Omdat zeer zware sterren daar minder snel materie verliezen, houdt een ster aan het einde van zijn leven nog ongeveer een kwart van zijn massa over. Daardoor is het mogelijk dat het inwendige van zeer zware sterren onstabiel wordt vooraleer in het centrum een ijzerkern wordt gevormd. Men noemt deze instabiliteit 'elektron-positron paarvorming'. De temperatuur kan er immers zo hoog worden dat er spontaan elektronen en positronen worden gevormd uit de intense gammastraling in het sterinwendige. Dat kost veel energie, waardoor de inwendige druk grotendeels wegvalt en de ster ineenstort. Daardoor kan de temperatuur in de ster zo fel oplopen, dat er overal kernreacties op gang komen. De ster wordt dan in een krachtige explosie helemaal vaneengereten. Het resultaat is een uitdijende supernovarest, zonder neutronenster of zwart gat.

Supernovae die ontstaan door elektron-positron paarvorming zijn echter bijzonder zeldzaam. Voor sterren in de Grote Magellaanse Wolk treedt de paarvorming-instabiliteit pas op wanneer de ster bij zijn geboorte zwaarder is dan circa 150 zonsmassa. Dikwijls leidt de instabiliteit enkel tot wat materieverlies: er is pas een echte supernova-explosie wanneer de ster oorspronkelijk zwaarder was dan ongeveer 400 zonsmassa!

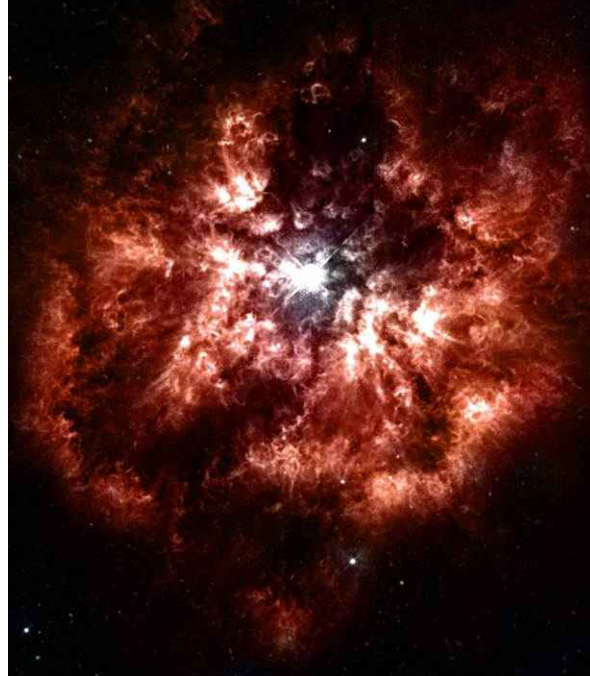
Enkel wanneer sterren zeer weinig elementen, zwaarder dan helium, bevatten, is er een redelijke kans om dergelijke supernovae waar te nemen. Dat kan bijvoorbeeld in verafgelegen sterrenstelsels, die we zien zoals ze er lang geleden uitzagen, toen het heelal nog maar weinig zware elementen bevatte. Van een tweetal recente supernovae (SN 2006gy en SN 2007bi) heeft men gesuggereerd dat ze werden veroorzaakt door een paarinstabiliteit. Dat is echter nooit overtuigend bewezen en beide explosies kan men ook door vrij 'gewone' supernovae verklaren.

### Zeldzaam maar waardevol

Zeer zware sterren zijn zeer schaars. Van alle sterren, zwaarder dan 8 zonsmassa, zijn slechts 2% zwaarder dan 120 zonsmassa. Omdat ze echter zeer actief zijn, hebben ze een sterke invloed op hun omgeving. Hun intense licht doet het gas in de buurt oplichten tot een HII gebied. Omdat ze tijdens hun leven bijna al hun materie verliezen door sterrenwind, verrijken ze het interstellair gas in sterrenstelsels met stikstof, koolstof en zuurstof. Een enkele supernova die veroorzaakt wordt door paarvorming kan tot 40 zonsmassa ijzer produceren en tot 30 zonsmassa zuurstof en silicium; dat zijn zeer aanzienlijke bedragen. Daardoor zijn zeer zware sterren toch van belang, ondanks hun zeldzaamheid.

*Volgende keer: Deel IV: De eerste sterren.*

Een opname van het stelsel NGC 1260 met bovenaan rechts de supernova SN 2006gy. De lichtcurve (onderaan) toont aan dat dit een zeer heldere supernova was, die misschien werd veroorzaakt door de ontploffing van een zeer zware ster. *Figuur: NASA/CXC/M.Weiss; Lick/UC Berkeley/J.Bloom & C.Hansen.*



Deze opname van de buurt van de Wolf-Rayet ster WR 124 toont de intensiteit van sterrenwind bij zeer zware sterren. Rondom de ster zien we een nevel (M1-67), die bestaat uit gas dat de ster aan grote snelheid heeft uitgestoten. WR 124 bevindt zich in het uiterste zuidwesten van het sterrenbeeld Sagitta (Pijl). Dit beeld is samengesteld uit originele opnamen met de Hubble Space Telescope (HST proposal 6787, A. Moffat). Het is ingekleurd aan de hand van een opname van de nevel, gemaakt met de VLT (ESO).

